

文章编号:1007-2780(2016)08-0840-06

基于暗通道先验的图像去雾算法改进

王 凯^{1,2*}, 王延杰¹, 樊 博^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了实现基于物理模型的图像复原去雾算法,文中提出了一种改进的基于暗通道先验的图像去雾算法。介绍了雾天图像退化模型和基于该雾天图像退化模型的几种去雾算法。详细介绍了何恺明提出的基于暗通道先验的去雾算法,该算法在估计光线传播图时使用的基于导向滤波的软抠图非常耗时,经过改进,直接使用景深估计光线传播图,算法运行时间大大减少。最后,使用 MATLAB 对改进的去雾算法进行仿真,并与原算法的运行时间进行比较。结果显示新方法对光线传播图的估计可靠,运行时间对比改进前大约下降 60%,实时性大大提高。带有天空的有雾图像去雾后色斑和光晕大幅减少,取得了很好的效果。改进的去雾算法运行速度快、去雾效果好,新提出的光线传播图估计方法可靠,并且去雾过程中得到的光线传播图可以用于其他应用。

关 键 词:去雾;暗通道先验;估计光线传播图;Sobel 算子

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163108.0840

Improved method for single image dehazing using dark channel prior

WANG Kai^{1,2*}, WANG Yan-jie¹, FAN Bo^{1,2}

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To develop an algorithm for haze removal based on the physics model, this paper proposes an improved and fast method for single image haze removal using dark channel prior. First, we introduce the degraded model for describing the formation of a haze image and several algorithms based on this model. Second, we introduce the method of He's single image haze removal using dark channel prior. The image quality of He's method is satisfactory, but it is a time consuming method because of refining the transmission map with guide filter. We propose an optimized method based on estimating transmission by scene depth directly and the runtime of the new algorithm decreases a lot. Finally, we realize the algorithm in MATLAB and compare the runtime with the original algorithm. Results demonstrates that the new method provides a reliable transmission estimation and a better image quality

收稿日期:2016-04-11; **修订日期:**2016-08-19.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No.2015AA7031010B)

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AA7031010B)

* 通信联系人, E-mail: wangkaicool@foxmail.com

with around 40% computation time of He's method, and the results of haze images with sky are less halos. The optimized method execute fast and the results demonstrate the new method abilities to remove the haze layer as well as provide a high quality transmission estimation as a byproduct of haze removal which can be used for other applications.

Key words: haze removal; dark channel prior; estimate transmission; sobel filter

1 引 言

随着环境污染的加剧,越来越多的城市频繁地出现了雾霾天气。雾霾不仅对人们的身体健康造成了巨大危害,同时也对视频监控设备的成像质量造成了严重影响,所以对视频监控设备在雾霾天气的成像质量提出了更高的要求。

目前图像去雾算法主要分为基于物理模型的图像复原去雾和基于图像本身的图像增强去雾。基于物理模型的图像复原去雾就是利用雾天图像退化模型,估计出模型参数,然后还原图像;基于图像本身的图像增强去雾不考虑雾气导致图像降质这一先验信息,直接使用某种图像增强算法进行去雾^[1]。本文介绍的去雾算法是基于暗通道先验的图像去雾算法^[2],并且针对该算法中的光线传播图的估计和暗通道的求取进行了改进。

2 雾天图像退化模型

在图像处理和计算机视觉领域经常使用的雾天图像退化模型是由 Srinivasa G. Narasimhan 和 Shree K. Nayar 在 2002 年提出的^[3]。雾天图像退化模型主要由两部分构成:场景反射(发射)光衰减模型和大气光成像模型。用于描述以上过程的数学模型为:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1 - t(x)),$$

其中: $I(x)$ 为观测点接收到的光强, $J(x)$ 为场景点辐射出的光强,也就是待恢复的无雾图像, $t(x)$ 为光线传播图, $t(x) = e^{-\beta d(x)}$, $d(x)$ 为观测点距场景点的距离, β 为大气光散射系数, β 在可见光范围内视为常数, $J(x)t(x)$ 项即为场景反射(发射)光衰减模型; A 为大气光值, $A(1 - t(x))$ 项即为大气光成像模型。

3 国内外研究现状

目前图像去雾算法主要分为基于图像本身的

图像增强去雾和基于物理模型的图像复原去雾。基于图像本身的图像增强去雾不考虑雾气导致图像降质这一先验信息,直接使用某种图像增强算法进行去雾,图像增强算法主要分为全局化图像增强和局部化图像增强,典型的全局化图像增强去雾算法主要包括全局直方图均衡化算法,这是最经典的图像增强算法,该方法实现简单,便于在嵌入式系统中实现^[4];同态滤波算法,同态滤波算法结合频率选择和灰度变换,利用压缩图像动态范围和增强对比度来改善图像质量;小波分析的方法,利用小波方法和多尺度分析进行去雾;基于 Retinex 算法的去雾方法,Retinex 理论基于颜色恒常性原理,最早由 Land 提出^[5]。局部化图像增强去雾算法主要包括局部直方图均衡化算法,其基本思想是利用自适应运算,将直方图均衡化算法分散到局部;局部对比度增强算法和局部方差增强算法等。

基于物理模型的图像复原去雾就是利用雾天图像退化模型,估计出模型参数,然后还原图像。基于物理模型的图像复原去雾主要包括基于偏微分方程的雾天图像复原^[6],基于深度关系的雾天图像复原^[7]和基于先验信息的雾天图像复原。针对第二部分的雾天图像退化模型,对于拥有 RGB 三个通道、 N 个像素的彩色图像而言,已知条件和未知条件如表 1 所示。

表 1 雾天图像模型中的各个变量
Tab.1 Variables of haze image model

变量	已知/未知	个数
$J(x)$	未知	$3N$
$I(x)$	已知	$3N$
$t(x)$	未知	N
A	未知	3

利用雾天图像退化模型可以列出 $3N$ 个方程,由表 1 可知其中已知量为 $3N$ 个,未知量为

$4N+3$ 个,因此这是一个病态问题,所以要对雾天图像退化模型进行适当地假设和约束才能求出无雾图像,近年来一些学者从这一思路出发对去雾算法进行了研究,取得了一些成果。例如 Tan 在文献[8]中提出,通过统计发现无雾图像与有雾图像相比一定具有较高的对比度,所以最大化有雾图像的局部对比度可以获得无雾图像,但是获得的图像在物理上看起来不是特别真实。Fattal 在文献[9]中指出,在光线传播图和场景表面阴影部分是局部不相关的假设下,可以推导出光线传播图和无雾图像。何恺明在 2009 年 CVPR 会议上发表了基于暗通道先验这一统计规律的去雾算法,取得了非常好的效果。

4 基于暗通道先验的图像去雾原理

暗通道的定义:在一幅拥有 RGB 三个通道的彩色图像 $J(x)$ 中,对 RGB 三个通道和以 $n \times n$ 大小的滤波器模板 $\Omega(x)$ (一般 n 为 15) 进行两次最小值滤波,即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y)).$$

经过对大量的室外无雾图像进行统计得出,室外无雾图像的暗通道具有性质 $J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 。

以下为基于暗通道先验的去雾算法:

(1) 对 $I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x))$ 等式两边的 RGB 三个通道同时除以大气光值 A , 得:

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = t(x) \frac{J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x)$$

(2) 大气光值 A 的求取:在 $I(x)$ 的暗通道图中选取最亮的 0.1% 的像素点,这些点是雾最浓的地方,再将这些点对应到原图像 $I(x)$ 的相同位置像素点,在原图像 $I(x)$ 的这些点中分别选取 3 个通道中最大的值作为大气光值;

(3) 光线传播图 $t(x)$ 的求取:同时计算等式两边的暗通道, $\min_{y \in \Omega(x)} (\min_c (\frac{I^c(y)}{A^c})) = \tilde{t}(x)$

$\min_{y \in \Omega(x)} (\min_c (\frac{J^c(y)}{A^c})) + 1 - \tilde{t}(x)$, 根据暗通道先验理论 $\min_{y \in \Omega(x)} (\min_c (\frac{J^c(y)}{A^c})) \rightarrow 0$, 所以可以得出

$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} (\min_c (\frac{I^c(y)}{A^c}))$ 。为了使图像看

起来真实在求取光线传播图 $\tilde{t}(x)$ 时要乘以一个系数 ω , 即: $\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} (\min_c (\frac{I^c(y)}{A^c}))$;

(4) 为了去除光晕现象需要对光线传播图 $t(x)$ 进行软抠图(soft matting), 一般情况下使用的是文献[10]中的导向滤波;

(5) 还原出无雾图像:利用公式 $J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A$ 分别在 3 个通道还原出无雾图像,利用该式求出的无雾图像亮度较暗,需要使用亮度增强算法进行一些亮度增强。

5 算法改进

用于软抠图的导向滤波计算过于复杂,需要多次重复计算滤波器系数,内存消耗量较大^[11],并且对带有天空的有雾图像去雾效果不太理想,去雾后图像的天空易出现大量色斑。本文使用一种新的算法。褚宏莉在文献[12]中提出可以直接使用 $t(x) = e^{-\beta d(x)}$ 求取光线传播图 $t(x)$, 而不使用较复杂的软抠图。在室外的无雾图像中,基于暗通道先验理论可以得出 $J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$, 而在有雾图像中,物点距观测点越远,则物点与观测点之间的雾气越多,则该点的 $J^{\text{dark}}(x)$ 越大,所以可以用 $J^{\text{dark}}(x)$ 近似表示 $d(x)$ 。

软抠图的作用是针对去雾后的图像的边缘处出现的光晕现象进行修复,由于求取暗通道时,滤波器模板取为 15×15 大小,容易将边缘处滤掉,那么可以在边缘处使用 3×3 大小的滤波器模板进行滤波,这样就能将边缘保留住。此时滤波前需要对图像使用 Sobel 算子进行边缘检测。

综上所述,本文使用的算法为:

(1) 对输入图像求取 $\min_c (I^c(x))$;

(2) 对求取的 $\min_c (I^c(x))$ 分别使用 3×3 大小和 15×15 大小的滤波器模板进行滤波,求得有雾图像的两个暗通道 $I_{\text{edge}}^{\text{dark}}$ 和 $I_{\text{noedge}}^{\text{dark}}$;

(3) 将原图像转换为灰度图像,然后使用 Sobel 算子分别计算 x 方向的梯度 g_x 和 y 方向的梯度 g_y , 再求取梯度的幅值 $M(x, y) \approx |g_x| + |g_y|$ ^[13], 制作出掩膜 BW_{mask} ;

Sobel 算子分别为:

-1	-2	-1	-1	0	1
0	0	0	-2	0	2
1	2	1	-1	0	1
Sobelx			Sobely		

(4)使用掩膜 BW_{mask} 对两个暗通道进行合成

$I^{\text{dark}}(x) = BW_{\text{mask}} \times I^{\text{dark}}_{\text{edge}} + (1 - BW_{\text{mask}}) \times I^{\text{dark}}_{\text{noedge}} ;$

(5)令 $d(x) = I^{\text{dark}}(x)$, $\beta = 1$,求取 $t(x) = e^{-\beta d(x)}$;

(6)求取 3 个通道的大气光值 A ;

(7)使用公式 $J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A$ 获得去雾图像;

(8)使用直方图均衡化进行一次亮度增强。

6 结果分析

在普通计算机上,配置为 Intel(R) Core (TM) i3-3240@3.40GHz 双核处理器和 4 GB 内存,使用 MATLAB 2014a 运行本文算法和 He 的算法,运行时间如表 2 所示。

表 2 运行时间对比

Fig.2 comparison of runtime		
图片	He 的算法	本文算法
图 2(a)	9.502 3 s	3.786 2 s
图 2(d)	12.465 5 s	4.755 7 s

本文算法运算时间相比 He 的算法降低了 60%,运算步骤也得到了简化,极大地提高了实时性,提高了将本文算法移植到嵌入式系统当中的可能性。图 1(a),(b),(c),(d)分别为原始图片,本文算法结果,Fattal 算法结果和 Tan 算法结果。本文算法相比于 Fattal 算法去雾更加彻底,相比于 Tan 算法色彩还原性更好,去雾后得到的图像色彩更接近于原图像。图 2 所示为本文算法和 He 的算法在 MATLAB 中的测试结果,图 3 中的(a),(b),(c),(d)分别为图 2(a)使用本文算法在去雾时生成的 $I^{\text{dark}}_{\text{noedge}}$, $I^{\text{dark}}_{\text{edge}}$, I^{dark} 和 BW_{mask} 。从图 3(d)的 BW_{mask} 可以看出,在求取 I^{dark} 时边缘和细节比较多的天安门城楼使用 $I^{\text{dark}}_{\text{edge}}$ 比较多,边缘和细节比较少的天空使用 $I^{\text{dark}}_{\text{noedge}}$ 比较多。从图 2(a)的处理结果图 2(b)可以看到,本文算法在处理含有天空的有雾图像时,天空色斑明显减少,去雾效果较好。

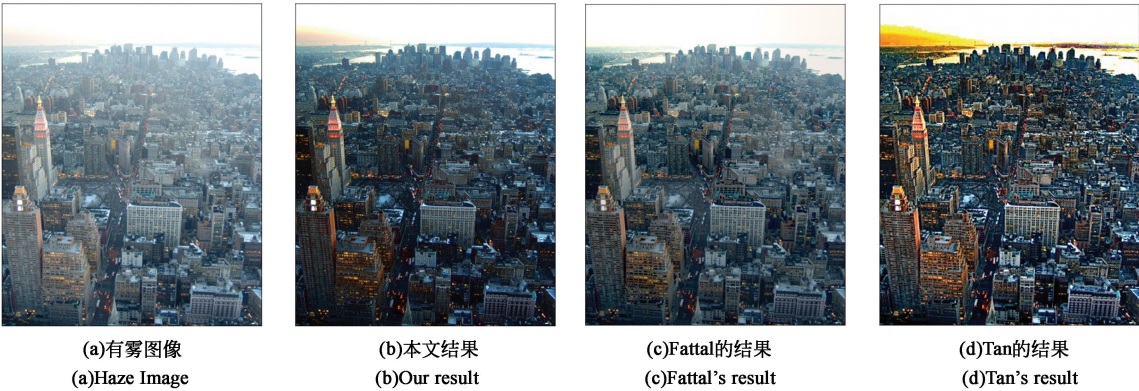


图 1 与 Fattal、Tan 的结果的比较

Fig.1 Comparison with Fattal's and Tan's result





图 2 与 He 的结果的比较
Fig.2 Comparison with He's result

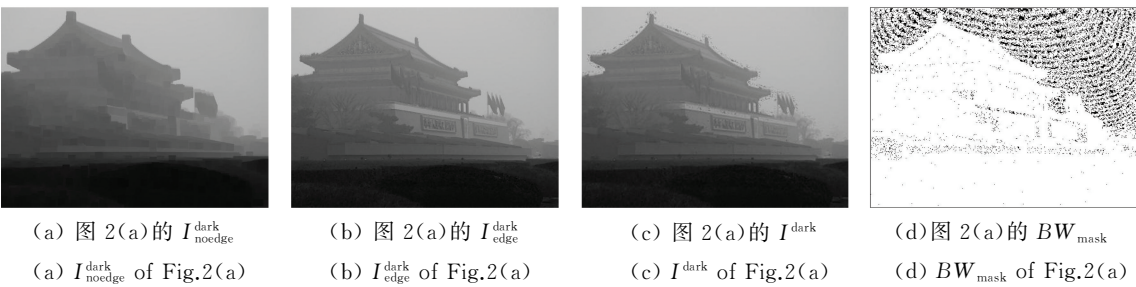


图 3 图 2(a)的 I_{dark} 和 BW_{mask}
Fig.3 I_{dark} and BW_{mask} of Fig.2(a)

7 结 论

本文在基于暗通道先验的图像去雾算法的基础上进行了改进,主要改进的是光线传播图的估计和暗通道的求取。我们使用梯度计算和制作掩

膜替代了较复杂的导向滤波。结果显示,对含有天空的有雾图像在去雾后消除了光晕和色斑现象,去雾效果较好,运行时间大约降低了 60%,速度显著提高,但是要实现真正地实时性,接下来的工作是将该算法移植到由 FPGA 和 DSP 组成的嵌入式系统当中^[14]。

参 考 文 献:

[1] 郭璠,蔡自兴,谢斌,等.图像去雾技术研究综述与展望[J].计算机应用,2010,30(9):2417-2421.
GUO F, CAI Z X, XIE B, et al. Review and prospect of image dehazing techniques [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(9): 2017-2421. (in Chinese)

[2] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1956-1963.

[3] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3): 233-254.

[4] 陈莹,朱明.多子直方图均衡微光图像增强及 FPGA 实现[J].中国光学,2014,7(2):225-233.
CHEN Y, ZHU M. Multiple sub-histogram equalization low light level image enhancement and realization on FPGA [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 225-233. (in Chinese)

[5] 肖燕峰.基于 Retinex 理论的图像增强恢复算法研究[D].上海:上海交通大学,2007.
XIAO Y F. Image enhancement and restoration algorithm based on Retinex [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)

[6] 孙玉宝,肖亮,韦志辉,等.基于偏微分方程的户外图像去雾方法[J].系统仿真学报,2007,19(16):3739-3744,3769.

- SUN Y B, XIAO L, WEI Z H, *et al.* Method of defogging image of outdoor scenes based on PDE [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(16): 3739-3744, 3769. (in Chinese)
- [7] OAKLEY J P, SATHERLEY B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1988, 7(2): 167-179.
- [8] TAN ROBBY T. Visibility in bad weather from a single image [EB/OL]. [2010-02-25]. <http://people.cs.uu.nl/robby/fog/index.html>.
- [9] FATTAL R. Single image dehazing [EB/OL]. [2010-02-25]. <http://www.cs.huji.ac.il/~raananf/projects/defog/index.html>.
- [10] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [11] 吴笑天,鲁剑锋,贺柏根,等.雾天降质图像的快速复原[J].中国光学,2013,6(6):892-899.
- WU X T, LU J F, HE B G, *et al.* Fast restoration of haze-degraded image [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 892-899. (in Chinese)
- [12] 褚宏莉,李元祥,周则明,等.基于黑色通道的图像快速去雾优化算法[J].电子学报,2013,41(4):791-797.
- CHU H L, LI Y X, ZHOU Z M, *et al.* Optimized fast dehazing method based on dark channel prior [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(4): 791-797. (in Chinese)
- [13] 冈萨雷斯,伍兹.数字图像处理[M].第3版.北京:电子工业出版社,2007,454-457.
- GONZALEZ R C, Woods R E. *Digital Image Processing* [M]. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007, 454-457. (in Chinese)
- [14] 贺柏根,刘剑,马天玮.基于 DSP+FPGA 的实时图像去雾增强系统设计[J].液晶与显示,2013,28(6):968-972.
- HE B G, LIU J, MA T W. Real-time image defogging and enhanced system designed based on DSP+FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 968-972. (in Chinese)

作者简介:王凯(1991—),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: wangkaicool@fox-mail.com